

引用格式:周建军,林京君,陈文祥,等. 摇摆条件下反应堆蒸汽发生器传热管振动特性分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 167-176. ZHOU Jianjun, LIN Jingjun, CHEN Wenxiang, et al. Analysis of vibration characteristics of steam generator heat transfer tubes in reactor steam generator under swaying conditions [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 167-176. DOI: [10.16516/j.ceeec.2025-049](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2025-049).

摇摆条件下反应堆蒸汽发生器传热管振动特性分析

周建军^{1,3}, 林京君^{2,✉}, 陈文祥², 蒋翰林²

(1. 三峡大学 理学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160)

摘要: [目的] 蒸汽发生器是反应堆系统的关键设备之一。流体诱发的振动可引起换热器管道和其他结构部件严重破坏, 严重影响设备安全运行。近年来, 随着大型水上舰艇以及浮动核电站的开建, 海洋条件下蒸汽发生器的应用越来越广泛, 海洋条件下, 载体的摇摆运动会使得蒸汽发生器的流致振动机理更加复杂, 影响设备安全运行。因此, 有必要开展摇摆条件下蒸汽发生器传热管的振动分析, 以了解海洋条件下传热管流致振动机理, 为后续的防护以及研究提供有益参考。[方法] 文章以蒸汽发生器直管段换热管作为研究对象, 采用单向流固耦合的方法, 对不同摇摆条件下换热管的应力、应变以及流场特性开展数值模拟研究, 并与无摇摆条件下的结果进行对比, 研究摇摆条件对换热管流致振动参数的影响机理。[结果] 结果表明: 相比无摇摆工况, 摇摆工况下, 传热管阻力系数呈周期性波动, 周期与摇摆周期一致, 传热管总变形和等效应力增大, 升力和阻力系数频域波动复杂, 且频域幅值随摇摆角度增大而增大。[结论] 海洋工况下传热管附近流体流动复杂, 传热管振动加剧, 此工况下发生安全事故的概率将增大, 需要更为严格的设计, 以确保设备的安全运行。

关键词: 流致振动; 流固耦合; 摇摆条件; CFD; 换热器; 传热管

DOI: [10.16516/j.ceeec.2025-049](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2025-049)

文章编号: 2095-8676(2025)04-0167-10

CSTR: [32391.14.j.ceeec.2025-049](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2025-049)

中图分类号: TL4; TK172



论文二维码

Analysis of Vibration Characteristics of Steam Generator Heat Transfer Tubes in Reactor Steam Generator Under Swaying Conditions

ZHOU Jianjun^{1,3}, LIN Jingjun^{2,✉}, CHEN Wenxiang², JIANG Hanlin²

(1. College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

3. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 100160, China)

Abstract: [Objective] Steam generators, as critical components of reactor systems, are susceptible to severe structural damage from flow-induced vibrations (FIV) in heat transfer tubes and other components, significantly compromising operational safety. With the recent development of large-scale marine vessels and floating nuclear power plants, the application of steam generators under marine conditions has expanded. However, the swaying motion of carriers in oceanic environments introduces complexities into FIV mechanisms, posing heightened risks to equipment integrity. Therefore, conducting vibration analysis of steam generator tubes under swaying conditions is essential to elucidate marine-specific FIV mechanisms and provide insights for safety design and mitigation strategies. [Method] Taking the straight tube segments in steam generators as the research objects, the stress, strain, and flow field characteristics under varying swaying conditions were numerically simulated using a one-way fluid-structure coupling approach. The results were compared with those under no oscillation conditions to study the influence mechanism of oscillation conditions on the flow induced vibration parameters of the heat exchange tube. Comparative analyses with non-swaying scenarios were performed to investigate the influence of swaying on FIV

收稿日期: 2025-02-27 修回日期: 2025-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“LHC 能区下核-核碰撞中喷注重建中背景扰动研究”(11847063); 矿物加工科学与技术国家重点实验室资助项目“浮选机内气泡破碎机理及其动力学特性研究”(BGRIMM-KJSKL-2023-13, Z2022398)

parameters. [Results] The results demonstrate that under swaying conditions, the drag coefficient of heat transfer tubes exhibits periodic fluctuations synchronized with the swaying period. Total deformation and equivalent stress in the tubes increase significantly compared to static conditions. Furthermore, the lift and drag coefficients exhibit complex frequency-domain fluctuations, with frequency-domain amplitudes amplifying proportionally to sway angles. [Conclusion] The fluid-structure interactions near the heat transfer tubes intensify under marine conditions, leading to aggravated vibrations and elevated risks of safety incidents. These findings underscore the necessity for stringent design criteria and enhanced vibration suppression measures to ensure the safe operation of steam generators in oceanic environments.

Key words: flow-induced vibration; liquid-solid coupling; rolling condition; CFD; heat exchanger; heat transfer tube

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

蒸汽发生器是反应堆热量输出的关键设备, 流体诱发的振动可能引起传热管和其他结构部件严重破坏^[1]。在海洋条件下, 蒸汽发生器会随载体发生摇摆、加速、减速等复杂运动^[2], 由此产生的附加载荷使得在流致振动计算时除了要考虑流体对传热管的冲击, 还需要考虑流体惯性以及换热器运动惯性之间的相互作用, 这会使得流致振动的机理更复杂。

当前, 针对无摇摆情况传热管的流致振动, 国内外学者已经开展了大量的研究工作。冯志鹏^[3]的研究结果表明升力系数和阻力系数与流速呈正相关。赵颖杰等^[4]的研究结果表明随负荷降低, 载荷降低, 相同高度热应力、机械应力与总应力均减小。刘乐等^[5]的研究结果表明直管段管壁温度变化与回路温度变化一致, 可以帮助对模型进行简化, 减少数值模拟运算量。而针对摇摆情况传热管分析, 则主要集中于传热特性的分析。魏敬华等^[6]的研究表明出口流量、流体温度波动周期与摇摆周期一样, 说明了在摇摆条件下, 换热器工作参数会产生周期性变化。Lihui He 等^[7]研究了倾角和横摇运动对压水堆的影响, 结果表明倾斜工况会影响直流蒸汽发生器的传热。Hao Sun 等^[8]的研究表明短暂倾斜、垂直起伏和周期性摆动条件下传热管表面的温度差异加大。对于摇摆条件下传热管的流致振动, 刘家仕等^[9]通过编写流体微团的受力方程 UDF, 在流体域壁面添加摇摆动量源项对摇摆条件下传热管进行受力分析, 有利于后续使用 UDF 实现摇摆运动下的数值仿真。

综上所述, 当前针对传热管流致振动的研究大部分都是基于陆基蒸汽发生器传热管开展, 对运动

条件下的传热管运行参数研究也大多是集中于传热特性方面, 对运动条件下传热管的流致振动研究较少。因此本文以蒸汽发生器直管段作为研究对象, 利用单向流固耦合方法, 研究摇摆条件对传热管流致振动参数的影响机理。通过本研究可以确定该计算方法的可行性, 有助于了解摇摆条件下传热管流致振动参数变化过程, 对于蒸汽发生器在海洋条件下的安全运行和优化设计做出了有益探索。

1 模型和研究方法

1.1 物理模型

本文以蒸汽发生器直管段为研究对象, 参考常见的设计尺寸, 建立了图 1 所示的模型, 其中一次侧流体为管内流体, 二次侧流体为管外流体, 两侧流体均为水。传热管外径 19 mm, 管壁厚度为 1 mm, 长度为 1 m, 传热管外部流体区域长度为 1 m, 宽和高均设置为 55 mm。

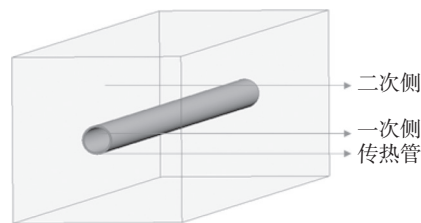


图 1 计算模型

Fig. 1 Computational model

当水处于高温高压环境时物理性质如表 1 所示, 蒸汽发生器中的传热管一般使用 Inconel-690 合金, 物性参数可由不同温度下的实验数据进行拟合^[10], 拟合关系如表 2 所示。

1.2 数学模型

在 Fluent 数值计算过程中主要基于质量、动量、能量守恒方程^[11]。

表1 流体物性参数

Tab. 1 physical parameters of fluid

参数	一次侧	二次侧
温度/℃	327	270
压强/MPa	15.5	6.71
密度/(kg·m ⁻³)	658.89	768.68
定容比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	3.03	3.1
运动粘度/(m ² ·s ⁻¹)	1.17×10 ⁻⁷	1.27×10 ⁻⁷
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.5	0.6

表2 Inconel-690 合金物性参数

Tab. 2 Physical parameters of Inconel-690 alloy

Inconel-690合金物性参数	关于温度的关联式
导热系数λ/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.0186T+6.62
杨氏模量E/GPa	-0.0757T+232.56
热膨胀系数α/(μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.0047T+12.36
切变模量G/GPa	-0.0337T+91.32

连续性方程:

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + u \frac{\partial U_i}{\partial x} + v \frac{\partial U_i}{\partial y} + w \frac{\partial U_i}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial V_i} = F_i + \mu \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial z^2} \right) + F_a \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

式中:

- ρ —— 流体密度(kg/m³);
- U_i —— i 方向速度分量(m/s);
- t —— 时间(s);
- p —— 压力(Pa);
- V_i —— i 方向位移(m);
- F_i —— i 方向体积力(N);
- μ —— 流体的动力粘度系数(Pa·s);
- F_a —— 摇摆附加力(N);
- C_p —— 流体比热容(kJ·kg⁻¹·K⁻¹);
- T —— 流体温度(K);
- u, v, w —— x, y, z 方向上的速度分量(m/s);
- λ —— 流体导热系数(W·m⁻¹·K⁻¹)

在摇摆条件下,一次侧和二次侧流体流速较高,容易产生较多的二次流,考虑到计算精度和效率,选取 Realizable $k-\varepsilon$ 模型作为湍流模型^[12-13]。模型包括湍动能 k 和耗散率 ε 2个输运方程,其方程如下^[14]:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:

- k —— 湍动能(m²/s²);
- ε —— 湍流耗散系数;
- μ_t —— 流体的湍流粘度(m²/s);
- μ_t, S_{ij} —— 流动的变形率张量;

其他参数均为常数,分别为: $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$ 。

1.3 边界条件设置

参考某蒸汽发生器的主要参数^[15],入口边界条件设置均为速度入口,一、二次侧入口速度大小分别为7 m/s、1 m/s,入口温度分别为327℃、270℃,一、二次侧流体介质均为水;出口设置均为压力出口边界条件,一、二次侧流体出口压强分别为15.5 MPa、6.71 MPa。

在FLUENT软件读入模型时,对于交界面会自动生成wall和wall-shadow,这样在交界面就可以定义一对耦合面,所以将传热管的内外壁面定义为耦合面,用于单向流固耦合中传递流体和固体的数据^[16]。

由于所涉及的流体都不可压缩,所以采用基于压力的求解器(pressure based solver);湍流模型选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,使用标准壁面函数(standard wall functions);其他保持默认设置;一般情况耦合采用SIMPLE算法,考虑到计算速度,动量、能量等均采用二阶迎风格式;松弛因子保持默认设置。计算过程考虑重力加速度影响,取 $g=9.81 \text{ m/s}^2$,方向垂直于传热管轴向。

通过UDF和滑移网格来模拟计算域的摇摆运动。摇摆运动可以看成是一个动态的倾斜过程,摇摆产生的附加惯性力会对系统的升力和阻力产生影响。摇摆条件下传热管的受力情况如图2所示,流体受到切向力、径向力和科氏力的作用。

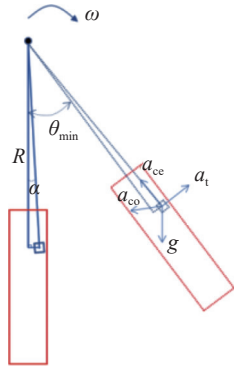


图 2 摇摆条件示意图

Fig. 2 Swing condition diagram

摇摆运动规律表达式^[17-18]如下:

$$\theta(t) = \theta_{\max} \sin\left(\frac{2\pi t}{\Delta T}\right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\omega(t) = \frac{2\pi}{\Delta T} \theta_{\max} \cos\left(\frac{2\pi t}{\Delta T}\right) \quad (7)$$

$$\beta(t) = -\left(\frac{2\pi}{\Delta T}\right)^2 \theta_{\max} \sin\left(\frac{2\pi t}{\Delta T}\right) \quad (8)$$

$$a_{ce} = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (9)$$

$$a_t = \vec{\beta} \times \vec{r} \quad (10)$$

$$a_{co} = 2\vec{\omega} \times \vec{v} \quad (11)$$

$$F_a = \rho \left[\vec{g} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) - \vec{\beta} \times \vec{r} - 2\vec{\omega} \times \vec{v} \right] \quad (12)$$

式中:

$\theta_{\max}$ ——最大摇摆角度($^{\circ}$);

ΔT ——摇摆周期(s);

ω ——摇摆角速度(rad/s);

β ——摇摆角加速度(rad/s²);

a_{ce} ——向心加速度(m/s²);

a_t ——切向加速度(m/s²);

a_{co} ——科氏加速度(m/s²)。

1.4 网格划分及无关性验证

由于流体在靠近壁面处的速度梯度和温度梯度变化比较大,所以在壳程和管程流体的近壁面区域采用膨胀(Inflation)方法对网格加密,在管道壁面处划分边界层网格,一次侧流体及其二次侧流体都有3层边界层网格,增长率均为1.2,网格划分如图3所示。

为了对网格数量进行合理选择,本文分别对5种网格数目下一次侧流体对传热管的压力分布进行了对比(见图4)。由图4可知当网格数目达到130万

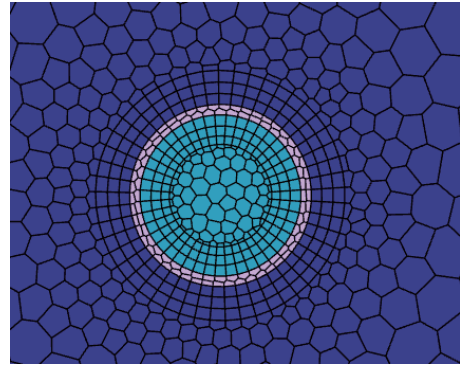


图 3 网格划分

Fig. 3 Grid division

后压力基本不变。因此,本文计算过程中选用总网格数目为1350046的网格模型。

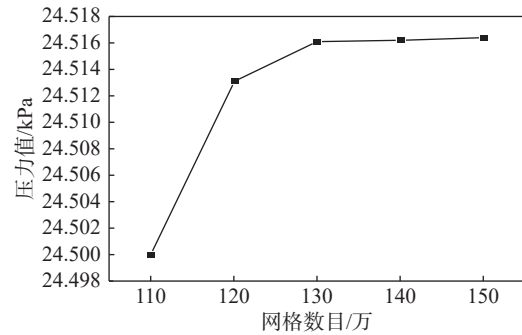


图 4 压力对比图

Fig. 4 Pressure contrast diagram

1.5 数值方法验证

为验证摇摆附加力是否准确施加以及 CFD 程序的准确性。参考相关文献^[19],在 Workbench 的 DesignModeler 模块建立和文献实验段相同的圆管来进行数值模拟,所选工况及相关参数如表3所示。选取圆管空泡份额与文献结果进行对比,如图5所

表 3 摇摆工况和物理模型尺寸

Tab. 3 Swing conditions and physical model size

参数	数值
压力/MPa	0.5
质量流速/(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	500
热流密度/(kW·m ⁻²)	350
进口温度/K	303
摇摆角度/ $^{\circ}$	20
摇摆周期/s	10
内径/mm	24
长度/m	1

示。由图5可知,对比结果良好,说明本研究添加的附加惯性力是成功且合适的,数值模拟方法具有一定的可靠性。

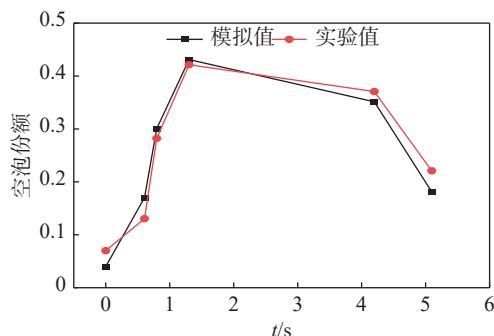


图5 数值模拟和实验结果对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation and experimental results

2 计算结果

在数值模拟过程中,首先利用 Modal 模块对传热管进行模态分析,再使用单向流固耦合方法对各参数进行分析,由于单向流固耦合只考虑一次侧和二次侧流体对传热管的作用,所以先在在 CFD 程序中求解出升力系数、阻力系数,再利用快速傅里叶变换得到升力系数的频域,最后通过 CSD 与 CFD 程序耦合求解出等效应力和总变形。

2.1 模态分析

为了确定传热管的固有频率和振动模态,本文对传热管的模态进行了研究。在 ANSYS WORKBENCH 里面的 Modal 模块进行模态分析,参考相关文献^[20],在传热管两端采用固定端支撑约束,约束其全部自由度。由于固体的振动受前几阶频率的影响比较大,所以本文只分析传热管的前 6 阶频率特性,前 6 阶频率分布如表 4 所示。

表 4 传热管固有频率

Tab. 4 Heat transfer pipe frequency

阶数	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	57	57	158	158	309	309

传热管在不同模态振型下变形如图 6 所示。

为了能较为直观地了解传热管的变形情况,对传热管的变形趋势进行了放大处理,云图显示的总变形所表示的是整体网格相对于初始位置的偏移量。

由图 6 可见,在前 6 阶固有频率中,奇数阶固有频率表现为传热管的面内振动,偶数阶固有频率表现为传热管的面外振动。同时,由表 4 可知,传热管面内振动和面外振动的固有频率相同,这主要是由于传热管具有对称性,导致截面两侧方向刚度相同。

2.2 摇摆对升力系数的影响

升力是引起传热管振动的主要原因,在流体的作用下,传热管周围会周期性地产生和脱落漩涡^[21]。因此,本文对不同运动条件下传热管的升力特性进行了分析,无摇摆条件和不同摇摆角度下传热管的升力系数变化情况如图 7 所示。

由图 7 可见,无摇摆工况下由于漩涡和湍流作用。升力系数在 0 ~ 0.01 s 变化较大,最大值至 0.000 1,最小值至 -0.000 27,流体稳定后,升力系数保持在 -0.000 25 附近。

摇摆角度为 9°时,由于漩涡脱落频率增大及湍流作用,升力系数最大值为 0.07,最小值为 -0.07。随着摇摆角度增加,升力系数也随着增加,当摇摆角度增大到 72°时,升力系数最大值为 6.51,最小值为 -3.00,波动幅度为 9.51。说明随着摇摆角度增大,摇摆附加力也增大,摇摆角度越大对升力系数的影响也越明显。

2.3 摇摆对频域的影响

升力系数可以反映流场的特性,它所主导的频率就是流场的主频率。当流场的主频率与传热管的主频率相接近时,传热管将会出现共振现象,对设备造成危害。为了获取振动信号的频率特性,本文采用快速傅里叶变换方法对无摇摆和摇摆条件下传热管的升力系数进行了频谱分析。无摇摆工况下的频域如图 8 所示。

由图 8 可见,无摇摆工况下由于漩涡交替产生和脱落,传热管振动,振幅变化较大,达到 0.000 25 mm。流体稳定后,由于漩涡脱落频率远小于传热管固有频率,传热管振幅接近为 0。

不同摇摆角度下的频域分布如图 9 所示。

由图 9 可见,在摇摆角度为 9°时,由于摇摆附加力及惯性力的作用。振幅最大值为 0.024 mm,最大值出现在频率为 0 ~ 10 Hz 时,之后随着频率的增加振幅逐渐趋于平稳。当摇摆角度逐渐增大时,传热管的振幅也会相应地增加,当摇摆角度为 72°时,振幅的最大值达到了 0.92,振幅最大值发生的频率范

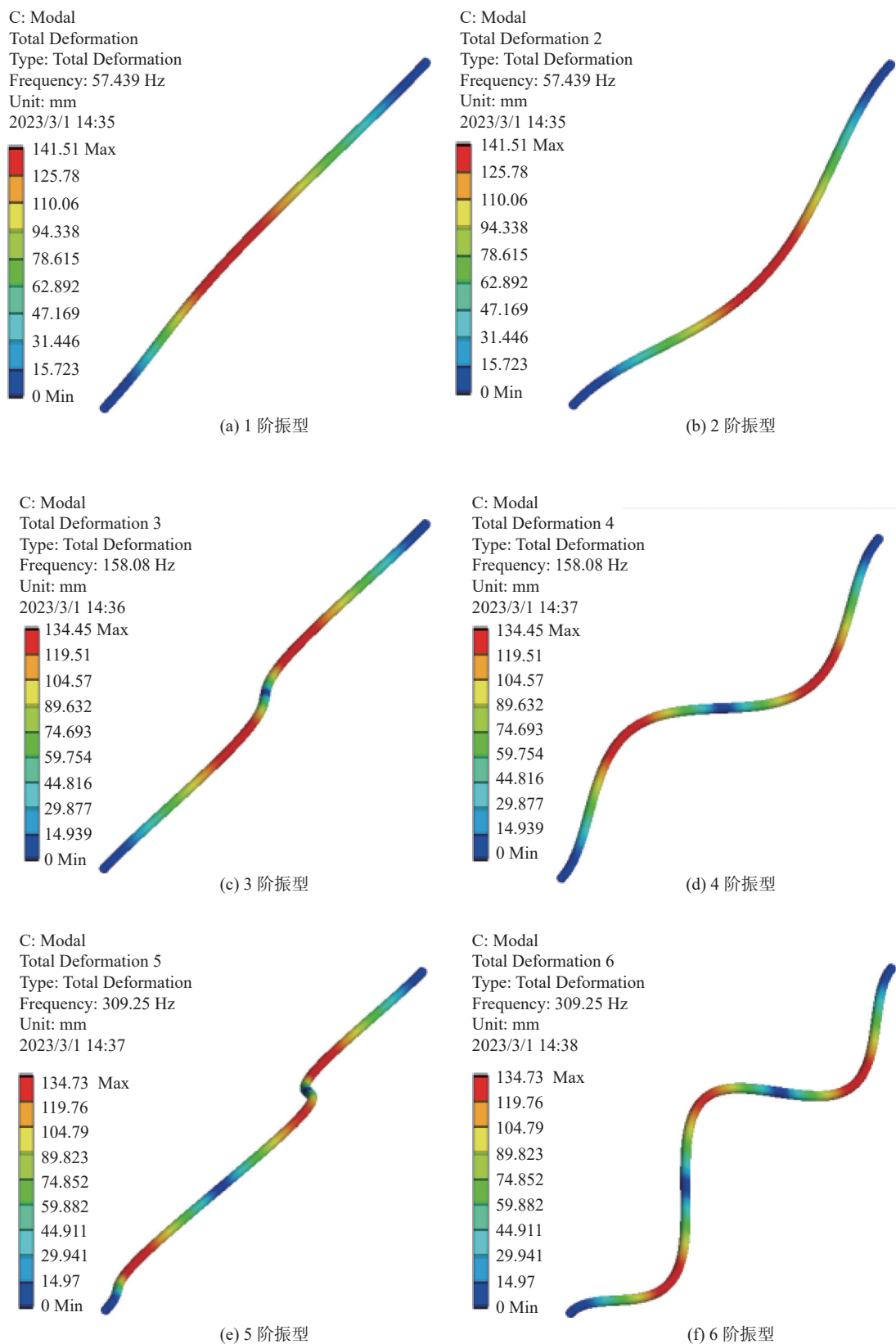
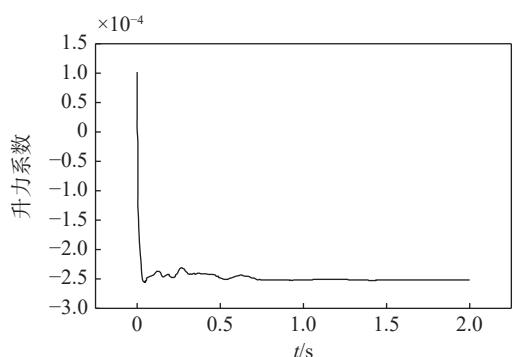
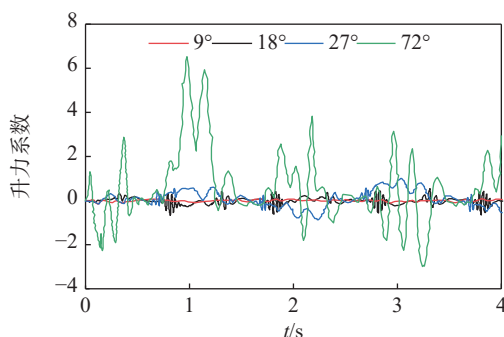


图 6 传热管振型示意图

Fig. 6 Heat transfer tube vibration type diagram



(a) 无摇摆工况下传热管升力系数



(b) 不同摇摆工况下传热管升力系数

图7 升力系数变化图

Fig. 7 Variation of lift coefficient

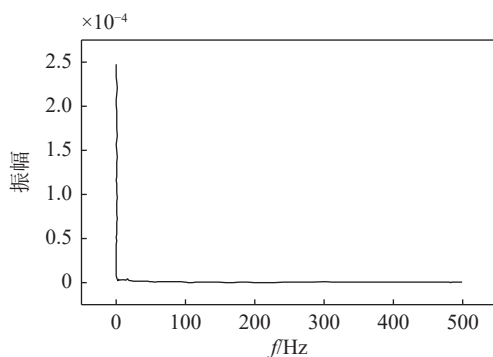


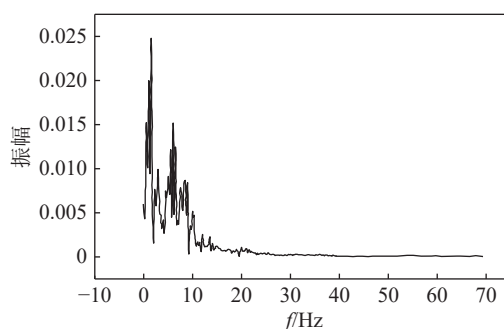
图8 无摇摆工况下升力系数频域图

Fig. 8 Frequency-domain characteristics of lift coefficient under static conditions

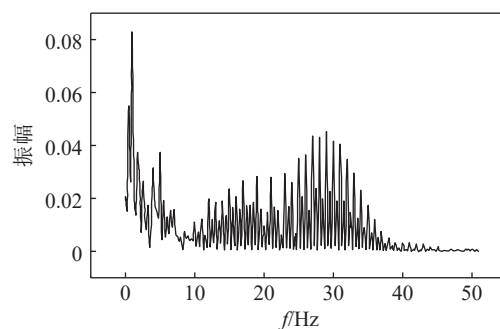
围为 0 ~ 10 Hz, 而且随着摇摆角度的增加, 振幅发生变化的频率范围也会增大, 摇摆角度为 18° 和 27° 时在 30 Hz 左右都会出现比较明显的振幅变化。

2.4 摇摆对阻力系数的影响

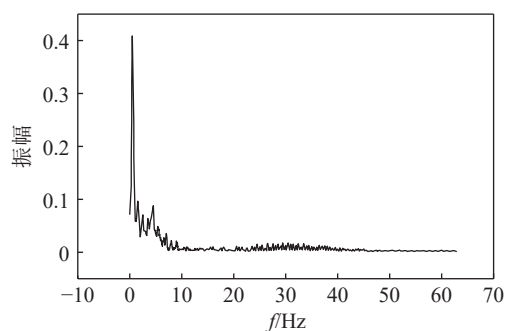
虽然阻力不是引起传热管振动的主要原因, 但在阻力方向上流体也会出现流体弹性不稳定^[22-23], 会对传热管的振动产生重要影响。因此, 本文对不同运动条件下传热管的阻力系数进行了分析, 无摇摆条件和不同摇摆角度下传热管的阻力系数变化情况



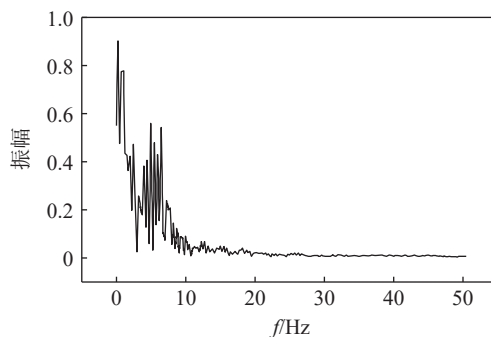
(a) 摇摆角 9°



(b) 摇摆角 18°



(c) 摇摆角 27°



(d) 摇摆角 72°

图9 摇摆工况下升力系数的频域特性图

Fig. 9 Frequency-domain characteristics of lift coefficient under swaying conditions

如图 10 所示。

由图 10 可见, 在无摇摆工况下由于流体与管壁之间的相互作用及运动参数不稳定。阻力系数在

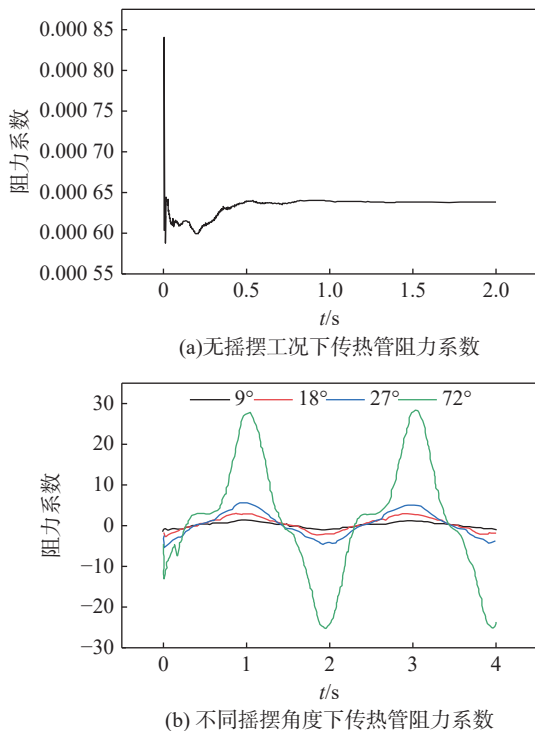


图 10 阻力系数变化图

Fig. 10 Variation of drag coefficient

0~0.5 s 波动幅度较大, 最大值为 0.00084, 最小值为 0.00062, 流体稳定后, 阻力系数保持在 0.00065 左右。

摇摆角度为 9° 时, 由于产生附加惯性力及附加压降, 阻力系数最大值为 1.5, 最小值为 -1.5, 波动幅度为 3.0, 随着摇摆角度的增加, 阻力系数也相应地增加, 摇摆角度越大, 阻力系数也越大, 当摇摆角度为 72° 时, 阻力系数最大值达到了 28.7。而且由于摇摆过程中附加压降对流动产生周期性的驱动和阻碍, 摇摆条件下阻力系数呈现周期性变化, 周期为 2 s。

2.5 摇摆对等效应力和总位移的影响

蒸汽发生器管束间流体流动情况复杂, 等效应力是核动力设备完整性和安全性研究的热点和难点, 通过数值模拟可以获得管束应力和变形的变化规律, 还能预测分析出传热管可能破损的位置, 为传热管破损机理提供参考依据。故本文对无摇摆和摇摆角度为 27° 的传热管进行了应力和变形分析, 分别如图 11、图 12 所示。

由图 11、图 12 可见, 无摇摆工况下由于中间位置所受弯曲应力较大, 因此最大变形发生在中间位置, 为 18 nm。由于管口处约束及中部弯曲应力, 导致等效应力分布近似表现为“两头大, 中间小”, 且

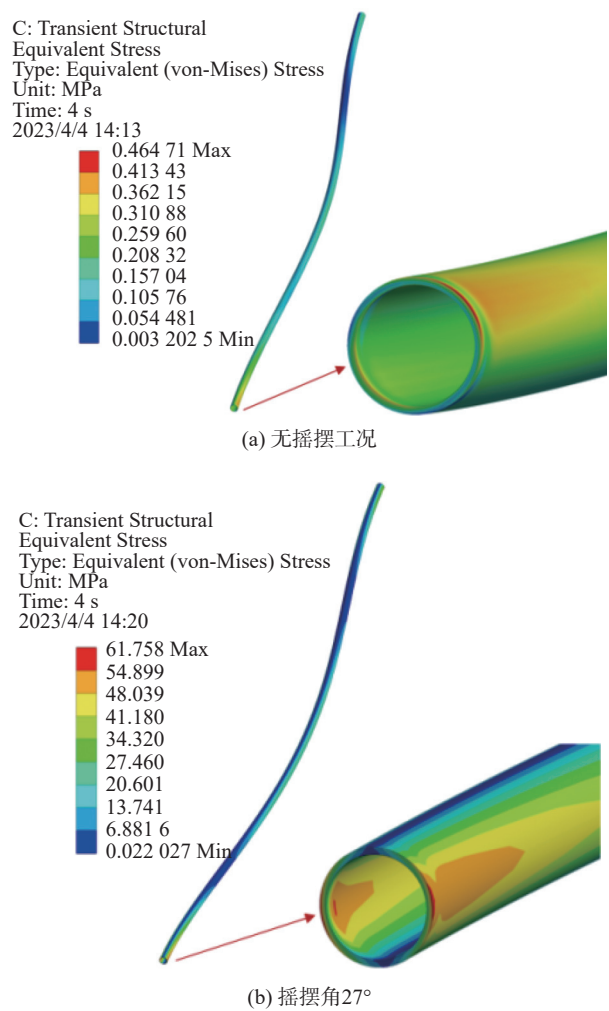


图 11 传热管等效应力

Fig. 11 Equivalent stress of heat transfer tube

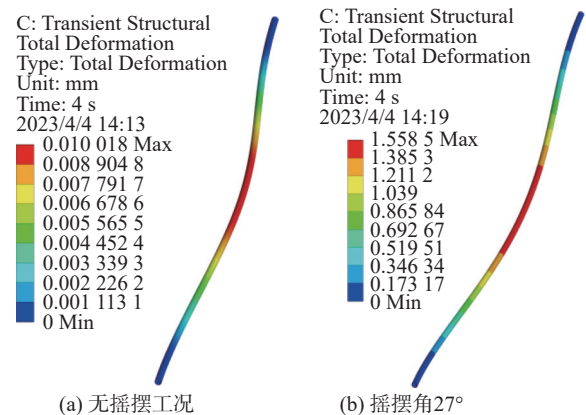


图 12 传热管总变形

Fig. 12 Total deformation of the heat transfer tube

最大等效应力出现在管口, 为 464.7 kPa。

摇摆角度为 27° 工况下由于升力及阻力系数

增大及摇摆附加力的作用。传热管最大变形为 1.5585 mm, 最小等效应力为 22.027 kPa, 最大等效应力为 61.758 MPa。本文采用第四强度理论计算米塞斯等效应力, 并进行强度校核, 其具体表达式^[24]如下:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (13)$$

$$\sigma_{eq} \leq [\sigma] \quad (14)$$

式中:

σ_{eq} ——等效应力(MPa);

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——主应力(MPa);

$[\sigma]$ ——许用应力(MPa)。

通过文献[10]可知传热管的屈服极限为 379 MPa, 依据 ASME 相关标准, 此工况下 $[\sigma]=252.6$ MPa, 传热管等效应力未超过 $[\sigma]$, 在使用的安全富裕度内。

和无摇摆条件相比, 传热管的最大变形、应力出现的位置都相同, 但是摇摆条件下, 流体流速和方向变化剧烈, 传热管受力不均匀, 使传热管的应力和变形分布有明显的分层。同时, 由于附加惯性力的作用, 传热管的最大应力和应变都会出现大幅度的增加。

3 结论

本文通过研究摇摆条件下单根传热管流致振动参数变化, 并与无摇摆情况下传热管的模拟仿真数据进行对比, 得出以下结论:

1) 摇摆条件下升力及阻力系数随摇摆角度增大而增大, 摇摆角度越大波动幅度越大, 且阻力系数存在周期性为 2 s 的周期性变化, 升力系数无明显周期性变化。

2) 摇摆条件下传热管频域最大振幅发生频率一般位于 0 ~ 10 Hz, 并且随着摇摆角度增加, 在 20 ~ 40 Hz 内振幅也会出现明显波动。

3) 摇摆条件下传热管的等效应力和总变形增大, 最大总变形发生于传热管中间位置, 最大等效应力出现在管口位置。

针对海洋工况, 本文对单相流下传热管振动进行研究, 存在一定的局限性, 未考虑传热管热应力, 后续相应工作可以在本文研究基础上进一步考虑热应力影响, 以更加贴近实际工况。

参考文献:

[1] 李振华. 核电蒸汽发生器传热管疲劳行为及损伤机理研

究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.

LI Z H. Study on fatigue behavior and damage mechanism of nuclear power steam generator tube [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.

[2] 陈冲. 海洋条件对矩形换热器温度波动特性的影响 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(17): 147-151. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2021.09.029.

CHEN C. Effects of ocean conditions on the fluctuation characteristics of wall temperature in a rectangular heat transfer exchanger [J]. Ship science and technology, 2021, 43(17): 147-151. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2021.09.029.

[3] 冯志鹏, 张毅雄, 臧峰刚. 蒸汽发生器传热管流致振动的数值研究 [J]. 机械设计与制造, 2014(4): 224-227. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2014.04.070.

FENG Z P, ZHANG Y X, ZANG F G. Numerical investigation of flow induced vibration in steam generator tube [J]. Machinery design & manufacture, 2014(4): 224-227. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2014.04.070.

[4] 赵颖杰. 蒸汽发生器传热管双向流热固耦合数值分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

ZHAO Y J. Two-way fluid thermal solid interaction numerical analysis of steam generator heat transfer tube [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.

[5] 刘乐, 陈文振, 黄文, 等. 蒸汽发生器一、二次侧稳态换热特性数值研究 [J]. 核科学与工程, 2020, 40(4): 596-602. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2020.04.012.

LIU L, CHEN W Z, HUANG W, et al. Numerical study on steady heat transfer characteristic between primary and secondary side of SG tube [J]. Nuclear science and engineering, 2020, 40(4): 596-602. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2020.04.012.

[6] 魏敬华, 潘良明, 徐建军, 等. 摇摆作用下矩形流道内单相流动与换热数值模拟 [J]. 核科学与工程, 2011, 31(4): 321-326.

WEI J H, PAN L M, XU J J, et al. Numerical simulation of single-phase flow and heat transfer in rectangular channel under rolling effect [J]. Nuclear science and engineering, 2011, 31(4): 321-326.

[7] HE L H, WANG B, XIA G L, et al. Study on natural circulation characteristics of an IPWR under inclined and rolling condition [J]. Nuclear engineering and design, 2017, 317: 81-89. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.03.033.

[8] SUN H, LIU X, LIAO H Y, et al. Experiment study on thermal behavior of a horizontal high-temperature heat pipe under motion conditions [J]. Annals of nuclear energy, 2022, 165: 108760. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108760.

[9] 刘家仕, 王建军, 张蕊. 海洋条件对波动管热分层效应影响数值分析 [J]. 原子能科学技术, 2021, 55(增刊 1): 45-51. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0833.

LIU J S, WANG J J, ZHANG R. Numerical analysis of effect of ocean condition on thermal stratification of surge line [J]. Atomic energy science and technology, 2021, 55(Suppl.1): 45-51. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0833.

[10] 张红斌, 李守军, 胡尧和, 等. 国外关于蒸汽发生器传热管用 Inconel 690 合金研究现状 [J]. 特钢技术, 2003(4): 2-11. DOI: 10.16683/j.cnki.issn1674-0971.2003.04.001.

- ZHANG H B, LI S J, HU Y H, et al. Research status on Inconel 690 alloy of heat transfer pipe of steam generator abroad [J]. *Special steel technology*, 2003, (4): 2-11. DOI: 10.16683/j.cnki.issn1674-0971.2003.04.001.
- [11] 李逸飞, 杜震宇, 华靖. 逆流式蒸发冷凝型烟气全热换热器的数值模拟研究 [J]. *重庆理工大学学报 (自然科学)*, 2023, 37(9): 312-321. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2023.09.035.
- LI Y F, DU Z Y, HUA J. Numerical simulation of countercurrent evaporative flue gas total heat exchanger [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (natural science)*, 2023, 37(9): 312-321. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2023.09.035.
- [12] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA journal*, 1994, 32(8): 1598-1605. DOI: 10.2514/3.12149.
- [13] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows [J]. *Computers & fluids*, 1995, 24(3): 227-238. DOI: 10.1016/0045-7930(94)00032-T.
- [14] 蔡翰翔, 陈超核. 双体风电运维船阻力 CFD 计算及降阻设计研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 20-28. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.003.
- CAI H X, CHEN C H. Research on CFD calculation and resistance reduction design of catamaran wind farm service vessel [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 20-28. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.003.
- [15] 许志斌, 吴婕, 全正庭, 等. 直流式蒸汽发生器压力控制仿真 [J]. *热力发电*, 2015, 44(12): 98-102. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2015.12.098.
- XU Z B, WU J, QUAN Z T, et al. Pressure control simulation for once-through steam generators [J]. *Thermal power generation*, 2015, 44(12): 98-102. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2015.12.098.
- [16] 付磊, 唐克伦, 文华斌, 等. 管壳式换热器流体流动与耦合传热的数值模拟 [J]. *化工进展*, 2012, 31(11): 2384-2389. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2012.11.002.
- FU L, TANG K L, WEN H B, et al. Numerical simulation of shell and tube heat exchanger fluid flow and coupled heat transfer [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2012, 31(11): 2384-2389. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2012.11.002.
- [17] 李鑫, 谢公南. 摇摆条件下棒束通道内超临界水流动传热特性 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(4): 623-634. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2022.04.009.
- LI X, XIE G N. Flow and heat transfer characteristics of supercritical water flowing in rod bundle channel under rolling conditions [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(4): 623-634. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2022.04.009.
- [18] 李隆键, 董相禄, 马建, 等. 摇摆条件下窄矩形通道内流动传热特性数值模拟 [J]. *核动力工程*, 2013, 34(4): 84-88. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2013.04.018.
- LI L J, DONG X L, MA J, et al. Numerical simulation on fluid flow and heat transfer characteristics of narrow rectangular channel in rolling motion [J]. *Nuclear power engineering*, 2013, 34(4): 84-88. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0926.2013.04.018.
- [19] 鲍伟, 陈炳德, 徐建军, 等. 摇摆条件下圆管内过冷沸腾局部空泡时空分布特性 [J]. *化工学报*, 2016, 67(6): 2277-2283. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151372.
- BAO W, CHEN B D, XU J J, et al. Distribution of local void fraction for subcooled boiling flow in rolling circular tube [J]. *CIESC journal*, 2016, 67(6): 2277-2283. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151372.
- [20] 李晓蒙, 杨林. 蒸汽发生器传热管束弯管区流致振动试验 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(6): 94-101. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.10.
- LI X M, YANG L. Experimental study on flow-induced vibration in bend zone of steam generator tube bundle [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(6): 94-101. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.10.
- [21] LI S L, ZHANG S B, JIANG Y Q, et al. The influence of swing movement on transient condensation thermo-fluidic performance for hydrocarbon mixture in a helical tube [J]. *International communications in heat and mass transfer*, 2024, 152: 107281. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107281.
- [22] 袁鑫. 核电厂热交换器传热管流致振动试验研究 [J]. *电工技术*, 2022(19): 204-206. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.19.062.
- YUAN X. Experimental study on flow induced vibration of heat exchanger tubes in nuclear power plant [J]. *Electric engineering*, 2022(19): 204-206. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2022.19.062.
- [23] XIONG G M, ZHU Y, LONG T, et al. Experimental study and analysis of design parameters for analysis of fluidelastic instability for steam generator tubing [J]. *Nuclear engineering and technology*, 2023, 55(1): 109-118. DOI: 10.1016/j.net.2022.09.004.
- [24] 陈向阳, 袁丹青, 杨敏官, 等. 基于流固耦合方法的 300 MWe 级反应堆主泵叶片应力分析 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(4): 111-115. DOI: 10.3901/JME.2010.04.111.
- CHEN X Y, YUAN D Q, YANG M G, et al. Blade stress of the reactor coolant pump of 300 MWe nuclear power plant in China based on fluid-solid coupling method [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2010, 46(4): 111-115. DOI: 10.3901/JME.2010.04.111.

作者简介:



周建军

周建军 (第一作者)

1980-, 男, 讲师, 博士, 主要从事核反应堆热工水利工程(e-mail)zjj6958@sina.com。

林京君 (通信作者)

2000-, 男, 硕士, 主要从事换热器传热及流致振动研究(e-mail)1216374788@qq.com。

(编辑 叶筠英)